

ESTUDO DA ERODIBILIDADE DO SOLO DE UMA ÁREA DE PROTEÇÃO INTEGRAL

STUDY OF SOIL ERODIBILITY IN AN INTEGRAL PROTECTION AREA

ANA PATRÍCIA NUNES BANDEIRA

Professora Dra., Universidade Federal do Cariri (UFCA), Ceará, Brasil, ana.bandeira@ufca.edu.br

JÉSSICA DE ALENCAR PINTO

Universidade Federal do Cariri (UFCA), Ceará, Brasil, jessicalencarpinto@gmail.com

REBECA RODRIGUES DE FREITAS

Universidade Federal do Cariri (UFCA), Ceará, Brasil, rebeca.rodrigues@aluno.ufca.edu.br

YCARO ALENCAR MACIEL SANTOS

Universidade Federal do Cariri (UFCA), Ceará, Brasil, alencar.ycaro@aluno.ufca.edu.br

RESUMO ABSTRACT

A erosão é um processo natural causado por agentes externos, principalmente a água e o vento. No entanto, quando há interferência humana inadequada, a erosão pode ser acelerada, causando diversos problemas, especialmente nos centros urbanos. É o que vem ocorrendo no Parque Natural Municipal das Timbaúbas, localizado no município de Juazeiro do Norte, interior do Ceará. O presente trabalho tem como objetivo apresentar resultados de ensaios realizados em uma amostra de solo para avaliação do potencial de erodibilidade, incluindo ensaio de permeabilidade e ensaio de estabilidade de agregados. A amostra tem textura do tipo areno-argilosa e areno-siltosa (SC-SM), com baixo coeficiente de permeabilidade (na ordem de 10⁻⁴ cm/s) e um percentual estável de agregados de 85,62%. Os resultados permitiram concluir que o solo do ponto estudado é de média suscetibilidade à erosão, no entanto, a concentração de águas de escoamento e outros fatores antrópicos inadequados têm contribuído para o surgimento de sulcos e ravinas. Diante da importância do parque e das constantes ações antrópicas inadequadas, que contribuem para a degradação do meio físico, torna-se essencial a implementação de medidas para mitigar os impactos ambientais, tais como obras de macro e microdrenagem, visando proteger e garantir a sustentabilidade da área.

Palavras-chave: erosão, ambiental, ensaio guelph, agregados.

Erosion is a natural process caused by external agents, mainly water and wind. However, when there is inadequate human interference, erosion can be accelerated, causing several problems, especially in urban centers. This is what has been happening in the Timbaúbas Municipal Natural Park, located in the municipality of Juazeiro do Norte, in the interior of Ceará. The present work aims to present results of tests carried out on a soil sample to evaluate the erodibility potential, including permeability test and aggregate stability test. The sample has a sandy-clayey and sandy-silty texture (SC-SM), with a low permeability coefficient (in the order of 10⁻⁴ cm/s) and a stable percentage of aggregates of 85,62%. The results allowed us to conclude that the soil at the studied point is of medium susceptibility to erosion, however, the concentration of runoff water and other inappropriate anthropogenic factors have contributed to the emergence of furrows and gullies. Given the importance of the park and the constant inadequate human actions, which contribute to the degradation of the physical environment, it is essential to implement measures to mitigate environmental impacts, such as macro and micro drainage works, aiming to protect and guarantee the sustainability of the park area.

Keywords: erosion, environmental, guelph test, aggregates.

1. INTRODUÇÃO

A erosão é um processo de desgaste da superfície terrestre causado pela ação de agentes externos, principalmente a água e o vento. É uma forma natural de modelagem do relevo e atua de modo conjugado aos processos de formação dos solos. Contudo, o uso e a ocupação desordenada do solo pelo ser humano aumentam a intensidade com que esse processo ocorre, causando desequilíbrio, o que acarreta problemas ambientais, sociais e econômicos, tais como perda de fertilidade dos solos com consequente redução na produção de alimentos; assoreamento de rios e lagos; deslizamentos em áreas de risco; e comprometimento de serviços públicos, como a interdição de estradas e a exposição ou ruptura de canalizações e dutos enterrados (Mascarenha et al., 2023).

De acordo com Bertoni e Lombardi (1999), a compreensão das erosões envolve dois tipos de forças, as ativas e as passivas. Enquanto as forças ativas, como a intensidade das chuvas e a incli-

nação do terreno, desencadeiam ou exacerbam o processo erosivo, as forças passivas, relacionadas às propriedades físicas do solo, atuam como fatores de resistência à propagação da erosão. Essa abordagem destaca a necessidade de uma análise detalhada desses fenômenos para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção e mitigação dos problemas.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo apresentar resultados de um estudo do potencial de erodibilidade de uma amostra de solo de uma área de proteção integral denominada Parque Natural Municipal das Timbaúbas (PNMT), situada em Juazeiro do Norte, no interior do Ceará (Figura 1). A área é uma unidade de conservação dedicada à preservação da Várzea da Timbaúba e de seus mananciais. Essa área, com 23,4 hectares, abriga 11 fontes naturais que desempenham um papel fundamental no abastecimento de água potável para cerca de 70% da população da cidade (Moreira et al., 2023).

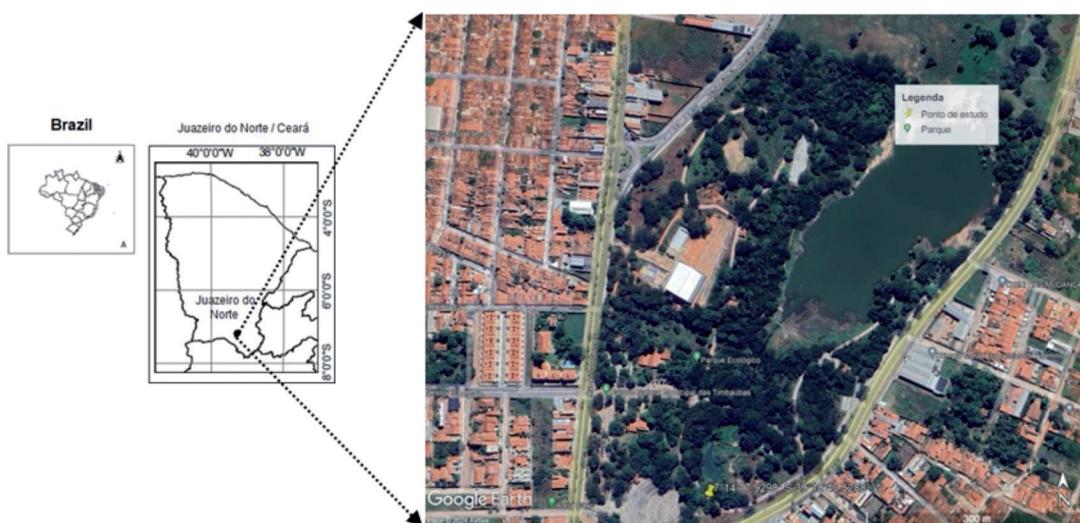


Figura 1. Parque Natural Municipal das Timbaúbas

(Fonte. Adaptado de Google Earth).

Bandeira et al. (2021), Costa (2023) e Silva (2024) apresentam resultados de investigações geotécnicas realizadas em amostras de solos coletadas em diferentes pontos do Parque. Os autores afirmam que os solos apresentam partículas com predominância de textura arenosa, podendo ser

enquadrados como areia siltosa (SM) e/ou areia argilosa (SC). Apesar da presença de partículas de siltos e argilas, em geral, os solos da Unidade de Conservação apresentam elevados potenciais de erosão, sendo visíveis na área várias cicatrizes erosivas, devido às influências no processo, como

fatores naturais e antrópicos inadequados, que serão apresentados mais adiante.

Costa (2023) estudou uma amostra de textura areno-argilosa/areno-siltosa (SC-SM) coletada no PNMT. Essa textura do solo, de acordo com Llopis Trillo (1999), indica que o solo pode ser classificado como de média a alta suscetibilidade à erosão. Costa (2023) também fez uma avaliação direta do potencial de erodibilidade, por meio do ensaio de Inderbitzen, encontrando uma taxa de erodibilidade (K) superior a $0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$, tanto para a amostra de solo ensaiada na condição natural quanto na condição inundada, sendo enquadrada, nas duas condições do ensaio, como altamente suscetível à erosão, de acordo com Bastos (1999). O ensaio de permeabilidade, realizado em laboratório por Costa (2023), revelou um coeficiente de permeabilidade em torno de $8,8 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. Segundo Terzaghi e Peck (1967, apud Lambe e Whitman, 1969), coeficientes de permeabilidade situados na faixa de 10^{-3} cm/s a 10^{-5} cm/s são considerados de baixa permeabilidade. A presença de argilas e siltos no agregado (28%) pode justificar o enquadramento na classe de baixa permeabilidade, apesar da predominância da textura arenosa no solo.

Segundo Camapum de Carvalho et al. (2023), os fenômenos envolvendo o transporte de massa em solos, sejam relacionados ao fluxo de água ou

de outras substâncias pelos seus interstícios, possuem grande importância na engenharia geotécnica. Os problemas de erosão, por exemplo, devem ser investigados por meio dos diversos fatores causais, incluindo o conhecimento acerca das propriedades hidráulicas do solo e das condições de contorno do problema.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Atualmente, o Parque Natural Municipal das Timbaúbas enfrenta desafios ambientais complexos. É muito comum, por exemplo, a presença de resíduos sólidos e o despejo de águas servidas provenientes das atividades humanas, que podem contaminar o lençol freático na zona de recarga de aquífero. Os efeitos das erosões na área do parque têm causado diversos impactos (Figuras 2a, 2b e 2c), desde a remoção da camada superficial do solo, descalçamento da base de pavimentos e até deposições das partículas erodidas nos corpos hídricos. A ausência de elementos de microdrenagem e as inadequadas ações humanas contribuem para o avanço dos processos erosivos. A crescente degradação do solo na área emerge como uma questão crítica que demanda atenção imediata e estratégias eficazes de conservação.



a) Arraste e deposição de partículas



b) Cicatriz de erosão pela ausência de elementos de microdrenagem



c) Descalçamento severo de passeio

Figura 2. Danos causados pelos processos erosivos no Parque Natural Municipal das Timbaúbas.

Para o desenvolvimento deste artigo, foram realizados ensaios de permeabilidade com o permiâmetro de Guelph no mesmo ponto de amostragem do estudo de Costa (2023) e ensaios de análise de estabilidade de agregados em laboratório,

na mesma amostra de solo, a fim de complementar as informações obtidas anteriormente. Na Figura 1 apresentada anteriormente, pode-se observar o ponto de coleta da amostra de solo, localizado nas coordenadas $7^{\circ}14'17.9298'' \text{ S}$ e $39^{\circ}18'40.5288'' \text{ W}$.

2.1 Ensaio de Permeabilidade com Permeâmetro de Guelph

O ensaio de permeabilidade foi realizado com o Permeâmetro de Guelph (Figura 3), seguindo as recomendações de Reynold et al. (1983), com aprimoramentos subsequentes realizados pela Universidade de Guelph, Canadá, conforme descrito por Reynolds e Elrick (1985; 1986) e Elrick et al. (1989).

Para realizar o ensaio, foi aberto um furo no solo, com 40 cm de profundidade, por meio de um trado manual. Em seguida, um volume constante de água foi introduzido no equipamento, impondo valores de carga total de 15 cm e 20 cm. Após medições consecutivas de vazões, o poço atingiu um estado estacionário, onde foi possível obter a taxa de infiltração de água, que se tornou constante. Esse estado estacionário foi então utilizado para calcular a condutividade hidráulica do solo.



Figura 3. Ensaio de permeabilidade com Permeâmetro de Guelph na área de estudo.

2.2 Ensaio de Análise de Estabilidade de Agregado

O ensaio de estabilidade de agregado é um método qualitativo para estudar a suscetibilidade dos solos aos processos erosivos. Esse ensaio consiste em mensurar a quantidade e a distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água. A metodologia do ensaio está descrita a seguir, baseada na publicação de Mascarenha et al. (2023):

a) Coleta no campo de um bloco indeformado de solo. O bloco de solo foi envolvido com papel filme e acondicionado em caixa de ma-

deira com serpilha para não danificar a estrutura durante o transporte para o laboratório.

- b) Destorramento do bloco de solo de forma cuidadosa para não quebrar os agregados de solo, em cima de um conjunto de peneiras de malha 4,75 e 2 mm.
- c) Retirada de três amostras de 25 g do solo retido na peneira de 2 mm em placas de Petri.
- d) Determinação do teor de umidade do solo por meio de uma das amostras de 25 g colocada em estufa por um período mínimo de 24 h.
- e) Umidificação das outras duas amostras de 25

- g e, após um período de 2 h, disposição em um conjunto de cinco peneiras, cada amostra, com 13 cm de diâmetro e abertura de malha de: 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,150 mm.
- f) Colocação do conjunto de peneiras em aparelho de Yoder (Figura 4), com nível de água até atingir a base da peneira de cima de 2 mm, tomando cuidado para não submergir as amostras na água.

- g) Ajuste do aparelho de Yoder para uma frequência de 32 oscilações por minuto por um período de 15 min, com a água encostando na malha da peneira de 2 mm.
- h) Após os 15 min, retira-se o jogo de peneiras. O conteúdo de cada peneira é transferido para uma placa de Petri devidamente identificada e tarada, e colocado em estufa por um dia para determinar a massa seca de cada fração desagregada.



Figura 4. Realização do ensaio de estabilidade de agregados

O diâmetro médio ponderado e o índice de estabilidade dos agregados são obtidos pelas Equações 1 e 2.

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i w_i) \quad (\text{Eq.1})$$

onde:

DMP é o diâmetro médio ponderado (mm), x_i é o diâmetro médio das classes (mm) e w_i é a proporção de cada classe em relação ao total.

$$IEA = \frac{MS - WP_{0,25}}{MS} \quad (\text{Eq.2})$$

onde:

IEA é o índice de estabilidade de agregados (%), MS é a massa seca da amostra (g), wp 0,25 é a massa dos agregados da classe < 0,25 mm (g).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio de Permeabilidade com Permeâmetro de Guelph

A Tabela 1 apresenta os dados obtidos durante o ensaio de permeabilidade e os resultados referentes aos coeficientes de permeabilidade. Os coeficientes obtidos foram de $1,17 \times 10^{-4}$ cm/s,

para carga hidráulica de 15 cm e de $7,62 \times 10^{-4}$ cm/s, para carga hidráulica de 20 cm. Os resultados obtidos em campo permitem enquadrar o solo como de baixa permeabilidade, conforme a proposta de Terzaghi e Peck (1967, *apud* Lambe e Whitman, 1969). Esses resultados estão em concordância com os encontrados anteriormente por Costa (2023), por meio de ensaio em laboratório ($8,8 \times 10^{-4}$ cm/s).

Tabela 1. Resultados do ensaio de Guelph

Parâmetros	carga hidráulica de 15 cm	carga hidráulica de 20 cm
Taxa de infiltração (cm/s)	0,05	0,1
Vazão no regime permanente (cm ³ /s)	1,87	4,02
Área do reservatório do permeâmetro (cm ²)	36,19	36,19
Diametro do orifício aberto a trado (cm)	5	5
Vazão no regime permanente (cm ³ /s)	1,87	4,02
Fator de forma (C)	0,131083	0,684627
Condutividade Saturada de Campo (Ks) (cm/s)	$1,17 \times 10^{-4}$	$7,62 \times 10^{-4}$

Caputo (1988), traz uma relação entre a variação do coeficiente de permeabilidade e o tipo de solo de acordo. Para o autor, solos que apresentam coeficientes de permeabilidade de 10^{-3} cm/s a 10^{-7} cm/s podem apresentar partículas de areia fina, silte e argila. Nesse contexto, o modelo proposto por Caputo (1988) está em concordância com a classificação do solo encontrada por Costa (2023), por meio de ensaios de caracterização (SC-SM).

Quanto à influência da permeabilidade nos processos erosivos, é importante destacar que quanto menor o grau de permeabilidade do solo, maior será a dificuldade da água da chuva se infiltrar, e consequentemente maior será o escoamento superficial, podendo contribuir com às ocorrências das erosões, quando outros fatores favorecerem o processo. A permeabilidade pode ainda ser menor quando o solo estiver na condição não saturada. Neste caso, segundo Camapum de Carvalho et al (2023), a infiltração da água se dará por efeito da sucção/capilaridade, submetendo a fase ar à pressão positiva capaz, dentre outros, de atuar desagregando o solo ou deflagrando processos erosivos.

Quanto aos outros fatores que interferem nos processos erosivos, destaca-se a característica do relevo, que tem atuação direta sobre o regime hídrico

do solo, aumentando ou diminuindo o volume de água presente no maciço e no escoamento. Segundo Silva (2011), a influência do relevo no regime hídrico do solo ocorre na escala local, e é função das seguintes características: altitude, declividade, comprimento, forma da vertente e exposição solar. Vertentes longas associadas com declividades elevadas, por exemplo, pode-se aumentar a energia cinética da água sobre a superfície, resultando em escoamentos superficiais maiores do que a taxa de infiltração e possibilitando a ocorrência de fenômenos como a erosão superficial. No caso do Parque Natural Municipal das Timbaúbas, estudos sobre caracterização morfométrica da microbacia hidrográfica, publicados por Bandeira et al (2021), indicaram canais retilíneos, que favorecem os escoamentos com maiores energia, e elevam o potencial de erosão do solo exposto.

Ainda segundo Bandeira et al (2021), a área de dentro do Parque, com total de 23,40 ha, apresenta cerca 6,2 ha (26,5%) de solo exposto e de áreas impermeabilizadas, que contribuem na potencialização dos processos erosivos. Já as áreas do entorno contribuem para o aumento de volume de águas de escoamento para dentro do Parque, apesar da baixa declividade da microbacia, devido ao uso e

ocupação do solo, caracterizado por moradias e instalações comerciais, com elevada taxa de impermeabilização. Outro fator, que vale destacar, trata-se das precipitações pluviométricas, que são irregulares e concentradas na região. A média do mês mais chuvoso da região, mês de março, é de 217,6 mm. Chuvas concentradas, na região de clima semiárido, com solo na condição não saturada, elevam o potencial de processos erosivos, que pode ser mais ainda intensificado devido à baixa permeabilidade do solo, que favorece o escoamento superficial, como é o caso da área de estudo.

3.2 Ensaio de Análise de Estabilidade de Agregado

A estabilidade dos agregados refere-se à resistência que o conjunto de partículas do solo apresenta em relação à ação das forças desagregadoras sobre eles. As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados obtidos no ensaio. Observa-se na Tabela 2 que a maior quantidade de massa retida (12,63 g), correspondente a cerca de 50% da amostra, se encontra na faixa de peneira de malha entre 4,75 mm e 2,0 mm.

Na Tabela 3, observa-se pelo índice de estabilidade de agregado (IEA=85,62%), que o solo apresenta boa agregação. Este resultado pode estar relacionado à presença da fração de argila no agregado (20,51%). Valor semelhante ao apresentado por Mascarenha et al (2023) em um solo de uma área de pastagem. Os autores apresentam resultados de ensaios de estabilidade de agregados de amostras de solo de duas áreas experimentais, sendo uma de mata secundária (IEA=75%) e outra de pastagem (IEA=85%); e concluíram que o maior teor de carbono orgânico do solo da área de pastagem contribuiu para a maior agregação.

Tabela 2. Classe de peneiras e massa de agregados em cada classe.

Classe de Peneiras (mm)	Massa de agregados em cada faixa de peneira (g)
4,75-2	12,63
2-1	0,69
1-0,5	7,38
0,5-0,25	1,26
0,25-0,150	0,9
<0,150	2,14

Tabela 3. Parâmetros de avaliação de estabilidade dos agregados

Parâmetros	Valor
Diâmetro Médio Geométrico (DMG)	0,89 mm
Diâmetro Médio Ponderado (DMP)	1,85 mm
Índice de Estabilidade dos Agregados (IEA)	85,62%

4. CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos neste estudo, e também de estudos anteriores, pode-se concluir que o solo do ponto específico onde foi coletada a amostra, no Parque Natural Municipal das Timbaúbas, pode ser classificado como de médio a alto potencial de erodibilidade. A presença de partículas de argila no agregado e o elevado índice de estabilidade contribuem para essa conclusão. No entanto, a concentração dos escoamentos pode provocar sulcos erosivos e ravinamentos, como foi constatado em estudos anteriores, por meio do método direto de Inderbitzen, o que é, de fato, confirmado em campo. As cicatrizes erosivas no parque estão relacionadas à falta de disciplinamento dos escoamentos, por meio de obras de microdrenagem, assim como a outros fatores antrópicos inadequados, como o lançamento concentrado de águas e a retirada da vegetação. Diante disso, é necessário adotar medidas de conservação e manejo adequadas para mitigar a erosão no parque, considerando que se trata de uma Unidade de Conservação importante para o município. A construção de barreiras físicas e drenantes, o plantio de vegetação apropriada e a implementação de técnicas de manejo sustentável para proteger a superfície do solo contra a erosão são medidas que podem ser adotadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação – PRPI da Universidade Federal do Cariri e ao Laboratório de Geotecnia pelo apoio essencial ao desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bandeira, A. P. N., Macedo, C. C. A., Clarindo, G. S.; Lima, M. G. S.; Souza Neto, J. B. Assessment of potential surface degradation resulting from erosion processes in environmentally protected area. Maio/2021. *Soils and Rocks. An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.*
- Bastos, C. A. B. Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. 1999. 251f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- Bertoni, J.; Lombardi, F. N. *Conservação do Solo.* 4º ed. São Paulo: Ícone Editora, 1999.
- Caputo, H. P. *Mecânica dos Solos: Fundamentos.* Ed. 6ª. Rio de Janeiro: JC Editora, 1988.
- Costa, José Guilherme Barbosa. *Investigação Geotécnica De Um Solo Sujeito A Processo Erosivo.* 2023. TCC (Graduação) - Universidade Federal do Cariri, [S. I.], 2023.
- De Carvalho, José Camapum et al. *Propriedades Químicas, Mineralógicas E Estruturais De Solos Naturais E Compactados.* In: *Solos não saturados no contexto geotécnico.* [S. I.: s. n.], 2023. cap. 4, p. 91-138.
- Elrick, D.E.; Reynolds, W.D. & Tan, K.A. (1989). Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis. *Groundwater Monitoring Review*, 9: 184-193
- Lambe, T.W., Whitman, R. V. *Soil Mechanics.* Massachusetts Institute of Techology. New York, 1969, 548p.
- Llopis Trillo, G. 1999. *Control de la erosión y obras de desagüe-Manual de estabilización y revegetación de taludes.* Entorno Grafico SL, Madri.
- Mascarenha *et al.* (2023). *Erosão.* In. Solos não saturados no contexto geotécnico. Capítulo 24. In. Camapum de Carvalho, J., Gitirana Junior, G. F. N.; Machado, S.L.; Mascarenha, M.M.A; Silva Filho, F.C.; Rodrigues, R.A. ABMS. Disponível em <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/978-65-992098-3-3>.
- Reynolds, W.D. & Elrick, D.E. (1986). A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity- -pressure head relationships. *Ground Water Monitoring Revenue*, 6(1): 84-95.
- Reynolds, W.D. & Elrick, D.E. (1985). In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the α -parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science*, 140(4): 292-302
- Reynolds, W.D.; Elrick, D.E. & Topp, G.C. (1983). A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Science*, 136: 250-268. *Simpósio Sobre Solos Não Saturados (2ND 1994 RECIFE).* Anais, 2o Simpósio Sobre Solos Não Saturados: 04 a 05 de abril de 1994, Centro de Tecnologia-UFPE, Recife-PE. Recife: Editora Universitaria, UFPE, 1994. 277 p.
- Silva, Roberto Cicero Alves. *Estudo Da Erodibilidade De Um Solo Do Parque Natural Municipal Das Timbaúbas.* 2024. TCC (Graduação) - Universidade Federal Do Cariri, [S. L.], 2024.
- Silva, A.S. (2011). *Solos Urbanos.* Guerra, A.T. *Geomorfologia Urbana.* Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp. 43-69.
- Tavares Moreira, Amanda Maria et al. *Desafios Estruturais e Socioambientais no Parque Natural Municipal das Timbaúbas, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil.* *Revista Ciência e Sustentabilidade*, v. 7, n. 1, p. 361- 390, 2023.